局所熱流束補正を考慮した単一円形衝突噴流熱伝達*

一 宮 浩 市^{*1}, 中 村 好 男^{*2}Heat Transfer of a Single Circular Impinging Jet
Considered on Heat Conduction in a Heated Plate

Koichi ICHIMIYA and Yoshio NAKAMURA

This paper describes the heat transfer characteristics of a single circular impinging jet with the compensated local heat flux. The local temperature distribution was obtained in detail by a thermocamera using liquid crystal. The deviated heat flux in the heated section (heated plate and basic plate) was evaluated by numerically solving the equation of heat conduction. The deviated heat flux was about 11% compared with uniform heat flux. Isothermal lines and iso-Nusselt number lines were also obtained locally.

Key Words: Thermal Engineering, Forced Convective Heat Transfer, Circular Impinging Jet, Liquid Crystal, Compensated Heat Flux, Heat Conduction

1. 結 言

衝突噴流は局所的に熱伝達あるいは質量伝達を促進させる方法の一つとして実験的にも解析的にも研究されてきた⁽¹⁾。著者らの一人も高温鋼片の温度の均一化⁽²⁾、電子機器の冷却⁽³⁾などに関連して主にスリットノズルの衝突噴流について検討してきた。しかし実用性を考慮した場合、ノズル形状が円形の場合のほうが良い場合も多い。単一円形ノズルによる衝突噴流は軸対称衝突噴流として Gardon ら⁽⁴⁾や、Popiel ら⁽⁵⁾が、無次元ノズル-衝突面間距離 $h/D=2.0$ (h : ノズル・衝突面間距離, D : ノズル径)以上の半径方向の熱伝達係数分布あるいは質量伝達係数を求めている。軸対称ということで議論が半径方向の分布に終始している。衝突状況を把握する意味で衝突面上の二次元的温度分布を感温液晶を使用して観察した例としては、横堀ら⁽⁶⁾、Goldstein ら⁽⁷⁾および木本ら⁽⁸⁾の研究があるが、局所熱伝達を定量的かつ二次元的評価するまでには至っていない。

本研究では、比較的狭いノズル-衝突面間距離(h/D

≤ 1.0)において単一円形ノズルと同じレベルに上壁を有する系で衝突面上の温度分布をコレステリック形感温液晶により二次元的に可視化し、この色分布を温度に定量化した。さらにこの温度分布を使用して加熱部内の熱移動を熱伝導で評価し正味の熱流束を求めて二次元的に局所熱伝達を評価した。

主 要 な 記 号

D : ノズル径

h : ノズル-衝突面間距離

H : ノズル-衝突面間無次元距離 $= h/D$

Nu : ヌッセルト数 $= \alpha \cdot D / \lambda$

Nu_{mean} : 平均ヌッセルト数

q_{acr} : アクリル基板内の偏差熱流束

q_{cond} : 全偏差熱流束

q_{net} : 正味熱流束

q_{sus} : ステンレスはく内の偏差熱流束

q_{unif} : 電気加熱からの一様熱流束

Re : レイノルズ数 $= u \cdot D / \nu$

T : 温度

T_{in} : 空気入口温度

T_w : 衝突面温度

* 原稿受付 平成3年7月9日。

^{*1} 正員, 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

^{*2} トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町1)。

- u : ノズル出口における平均流速
 α : 熱伝達係数 $= q_{\text{net}} / (T_w - T_{\text{in}})$
 λ : 空気熱伝導率
 ν : 空気動粘性係数

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。実験装置は大きく空気流動部、衝突面を含む加熱部、画像処理部に分けられる。作動流体としての空気は送風機により圧送されバルブにより規定流量に設定される。助走区間(ノズル径の20倍以上)を経た後、単一円形ノズル($D=50$ mm)出口より流体力学的にほぼ発達した状態で衝突面に垂直に噴出される。流体は衝突面(加熱面)に衝突し、流れ方向を変え、ノズルと同じレベルに断熱壁を有する流路出口より流出する。加熱部は、 $800 \times 800 \times 10$ mmの平滑なアクリル板の中央に温度測定用の感温液晶シートを接着し、その上に厚さ $30 \mu\text{m}$ のステンレスはくを接着することにより形成された。加熱はこのはくに直接通電させることにより行われた。感温液晶の色分布は光学フィルタ付きの CCD カメラより導入され、IP 2(Image Processor)とコンピュータにて処理された。なお空気入口温度は C-C 熱電対にて測定された。

測定は熱的および流体力学的にも発達した状態で行われた。衝突面温度 T_w および正味熱流束 q_{net} は3章および4章で示される方法にて求められた。熱的評価は局所ヌッセルト数 Nu およびノズル直下領域の平均ヌッセルト数 Nu_{mean} にて行われた。すなわち

$$Nu = q_{\text{net}} \cdot D / \lambda \cdot (T_w - T_{\text{in}})$$

$$Nu_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^n Nu(i) / n$$

ただし、 n はノズル直下領域内の画素数である。

実験は、ノズル径 $D=50$ mm に対し、 $h/D=1.0$, 0.4 , レイノルズ数 $Re=6000 \sim 40000$ で行われた。な

お、衝突面上の座標系の取り方を図2に示す。

3. 色分布の温度への変換

感温液晶に現れた色分布の温度への変換は校正実験において基本的に Akino らの方法⁽⁹⁾ を用いて行われた。液晶面からの散乱光を光学フィルタにより3種類の色分布に分解し CCD カメラによって輝度として計測する。各色成分の輝度値と輝度値の総和との比すなわち輝度比 r, g, b に対する一次回帰式により温度予測値を求めた。

$$T^* = \alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b + \delta$$

定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を予測値 T^* と校正実験の観測値との最大誤差が許容値内になるよう求めた。その結果、 $\alpha = -43.3507$, $\beta = 20.5906$, $\gamma = 30.5406$, $\delta = 9.20548$ となり、温度 30°C から 36°C の範囲で $\pm 0.05^\circ\text{C}$ の精度で測定可能となった。

4. 熱流束の補正

前述の方法により得られた高密度温度分布を使用し、加熱部を構成しているアクリル基板内およびステンレスはく内の熱伝導による熱移動を考慮して局所熱流

図2 座標系

図1 実験装置の概略

図3 アクリル基板内の熱平衡

束の補正を行った⁽¹⁰⁾。アクリル基板内における補正量 q_{acr} は微小要素として図3に示される, CCD カメラの1画素 (1×1.25 mm), 厚さ 0.5 mm の微小要素に対し流入する熱量を正, 流出する熱量を負として熱収支を考慮し, 境界条件として一面には得られた温度分布を他の5面には断熱条件を与え, 三次元定常熱伝導方程式をSOR法にて数値的に解いて求めた。ステンレスはく内における補正量 q_{sus} は, はくの厚さが $30 \mu\text{m}$ と1画素の寸法より薄いので厚さ方向には等温と考え二次元定常熱伝導として評価した。なお伝熱面からのふく射損失は系内の温度レベルおよび温度差がそれほど高くないことより考慮しなかった。その結果, 正味熱流束 q_{net} は電気入力を加熱板面積で除した q_{unif} と q_{acr} および q_{sus} の和となる。

5. 実験結果および検討

5.1 温度分布 図4(a)に感温液晶にて得られた写真を, 図4(b)に色分布を定量化した等温分布を

(a) 色分布

(b) 等温線

図4 衝突面上の温度分布
($H=1.0$, $Re=40\,000$)

$H=1.0$, $Re=40\,000$ に対して示す。図4(a)では青色部(高温)と黄緑部(低温)が目視的にはほぼ同心円上に現れている。等温線の間隔は 0.1°C で, 岐点を+記号, ノズル直下の領域を破線(直径 $D=50$ mm)で示す。岐点付近の温度はノズル直下領域のなかでは高いものの温度こう配は小さく, 流動方向を直角に変えるノズル径付近で温度は低下している。この領域では, 等温曲線が局部的に閉じた分布をしている。このことより衝突後の流れが非常に複雑な挙動をしていることが推測される。しかし, その外側の半径方向の無次元距離にして岐点から 0.7 から 1.0 の範囲では同心状に温度が上昇し, 周方向より半径方向の変化が支配的であることを示している。さらに下流では温度こう配は減少している。

この温度分布より4章の補正法を使用して局所的に熱流束の補正量を, 図4と同条件に対し求めたのが図5である。このときの q_{unif} は $q_{unif}=344 \text{ W/m}^2$ である。図5中で, +は電気的加熱量を伝熱面積で除した q_{unif} に加わることを, -はその逆を示している。等値線は 10 W/m^2 間隔であり, 太い実線は 0 W/m^2 以上の値を示し, 細い実線は負の値を示す。ノズル径(破線)の内側と外側の2箇所円周状に閉じた 0 W/m^2 の分布が生じている。ノズル下近傍では負の補正量が, 2箇所の 0 W/m^2 の間では正の補正量が, 外側では全体に負の補正量が存在している。

5.2 熱伝達 局所熱流束の補正を考慮した局所ヌッセルト数で熱伝達を評価する。

図6に $H=1.0$, 図7に $H=0.4$ に対する等ヌッセルト数分布を10間隔で示す。図(a), (b)は, それぞれ $Re=10\,000$, $40\,000$ における値である。 $H=1.0$ [図6(a)]では全体によどみ領域に対応して岐点(+印)付近の値は周囲より低く, ノズル径(破線)領域で極大値を示している。さらに外側の極小値に向かっては同心

図5 熱流束補正量
($H=1.0$, $Re=40\,000$)

円上に減少している。レイノルズ数の増大〔図 6(b)〕により、ノズル径内はより複雑な分布を示し、ノズル中心とよどみ点は必ずしも一致せず $Nu=250$ の位置が+印とずれており不安定性的の様子を現している。さらに+印より下流側に、無次元距離にして約1付近より閉じた極小値がみられるが、これは流れが伝熱面上で局所的であるが循環流が生じていると考えられる。ノズル-衝突面間距離が狭くなると(図7), ノズル下領域内では値が $H=1.0$ の場合より小さくなっている。これは流体の衝突により伝熱面付近の流れの層流性が強くなっていることを示しており, Gardon ら⁽⁴⁾ および Popiel ら⁽⁵⁾ の h/D が5付近で傾向が逆転して h/D が減少するにつれ岐点の Nu が減少しているのと同様の傾向である。しかし、ノズル径外になると、同じ流量では $H=0.4$ のほうが $H=1.0$ の場合より流速が大きくなるので Nu の値も高くなる。以上の二次元的分布は、従来の軸対称を考慮した半径方向のみの分布では得られない。その意味で本方法は衝突噴流熱伝達の全体を把握するのに重要であると考えられる。

図8に熱流束補正の有無による局所ヌセルト数の相違を衝突面の縦方向断面で示す。実線が正味熱流束

を使用した場合、破線が一樣熱流束として補正をしない場合の値を示す。定性的には同様の傾向を示しているが、補正により極大値はさらに高く、極小値はより低くなっている。局所的に最大のずれは $Re=10\,000$ で+側に11%、-側に8%、 $Re=40\,000$ で+、-側とも9%になっているが、 $Re=6\,000$ 程度では局所的に20%にも達している。このように比較的低いレイノルズ数でずれの割合は高くなる傾向にある。

図9にノズル-衝突面間距離による相違を $Re=$

(a) $Re=10\,000$

(b) $Re=40\,000$

図7 等ヌセルト数分布($H=0.4$)

(a) $Re=10\,000$

(b) $Re=40\,000$

図6 等ヌセルト数分布($H=1.0$)

図8 半径方向のヌセルト数分布
(熱流束補正有無の影響)

図 9 半径方向のヌッセルト数分布
(H の影響) $Re=40\,000$

図 10 平均ヌッセルト数分布

40 000 に対して示す。前述の図 7 において説明した傾向すなわちノズル下領域内で $H=1.0$ における Nu が $H=0.4$ における Nu より高いことが、比較することにより、より鮮明に現れている。したがって、ノズル径付近の極大値より下流側の極小値へのこう配が $H=1.0$ のほうがより強くなっている。しかし、これらの傾向は Re が低くなるとそれほど明確に差は現れなくなる。

各レイノルズ数に対する値を比較する意味でノズル下領域内の平均ヌッセルト数を図 10 に示す。従来、よみ点近傍の Nu は $Re^{0.5}$ に比例するとなっているが、本実験の場合、平均ヌッセルト数で $Re^{0.47}$ に比例する結果となった。平均的には大きい差はないと考えられる。

6. 結 言

比較的狭い空間における衝突噴流の熱伝達の特徴を求め一環として単一円形ノズルと同じレベルに上壁を有する系で実験的に熱伝達を評価した。衝突面の温度を感温液晶で可視化し、RGB 法にて温度に定量化した。この温度分布を使用し加熱部内の熱移動を考慮して局所熱流束を補正した。その結果、衝突面上の二次元温度分布および等ヌッセルト数分布が求められる

ようになった。特にノズル端下付近の極大ヌッセルト数および下流側の極小ヌッセルト数の局所的に閉じた複雑な分布状況が明らかになった。熱流束の補正の有無により局所的にレイノルズ数によってヌッセルト数に数%から 20%の相違が生じた。

本研究を進めるにあたり、日本原子力研究所・秋野詔夫、功刀資彰両氏に有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Martin, H., *Advanced in Heat transfer*, (1977), 12, Acad. Press.
- (2) 一宮・小林・越後, 機論, 53-486, B(1987), 511.
- (3) 一宮・保坂・越後, 機論, 54-497, B(1988), 142.
- (4) Gardon, R. and Akfirat, J. C., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 8(1965), 1261.
- (5) Popiel, C. O. and Boguslawski, L., *Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf.*, 3(1986), 1187.
- (6) 横堀・笠木・平田, 機論, 46-410, B(1980), 2010.
- (7) Goldstein, R. J. and Timmers, J. F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 25-12(1982), 1857.
- (8) 木本・飯塚, 第 27 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, A, 223(1990), 442.
- (9) Akino, N., ほか 4 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 111(1989), 558.
- (10) 功刀・ほか 3 名, 機論, 56-527, B(1990), 209.